

*Д. А. Корель, О. Л. Ташлыков, В. А. Мунц*

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

korelheatenergy96@gmail.com

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В БАССЕЙНАХ ВЫДЕРЖКИ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОСИФОНОВ

*В работе рассмотрен способ пассивного отвода остаточных тепловыделений отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в бассейне выдержки с помощью термосифонов для повышения безопасности в случае потери электроснабжения.*

Ключевые слова: *отработавшее ядерное топливо, бассейн выдержки, термосифон, коэффициент теплоотдачи, теплота, испарение, конденсация, теплоноситель.*

*D. A. Korel; O. L. Tashlykov, V. A. Munts*

Ural Federal University, Ekaterinburg

## IMPROVEMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL COOLING SAFETY IN COOLING PONDS USING THERMOSIPHONS

*The work considers a way of passive removal of residual heat from spent nuclear fuel in a cooling pond with the use thermosiphons in order to improve safety in case of power supply failure.*

Key words: *spent nuclear fuel, cooling pond, thermosiphon, heat transfer coefficient, heat, evaporation, condensation, heat carrier.*

Безопасность АЭС обеспечивается целостностью физических барьеров, предотвращающих попадание радиоактивных веществ в окружающую среду [1]. Одним из них является герметичная оболочка твэлов. Для обеспечения герметичности оболочек твэлов необходимо обеспечить надежный теплоотвод не только при работе реактора, но и

при хранении ОЯТ в бассейнах выдержки (БВ). Это связано с тем, что в ОЯТ продолжается радиоактивный распад продуктов деления ядерного топлива с выделением тепла (остаточное тепловыделение).

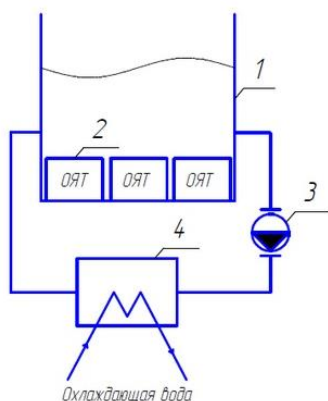


Рис. 1. Схема системы охлаждения ОЯТ: 1 – бассейн выдержки, 2 – пены с ОЯТ, 3 – циркуляционный насос, 4 – теплообменный аппарат

Вода БВ, нагретая за счет остаточных тепловыделений, насосом подается в теплообменник, охлаждается и возвращается в бассейн [2]. Система расхолаживания имеет трехкратное резервирование, но при потере электроснабжения охлаждение нарушается. Авария на АЭС «Фукусима» актуализировала необходимость повышения надежности охлаждения ОЯТ.

Одним из способов повышения надежности теплоотвода является использование пассивных систем, не требующих источников энергии. В качестве такой системы можно использовать термосифоны (ТС), поместив их в бассейн выдержки. Принцип работы ТС основан на испарительно-конденсационном цикле теплоносителя, заключенного внутри герметичного сосуда (рис. 2) [3].

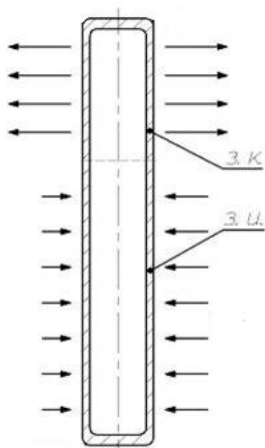


Рис. 2. Общий вид термосифона: з.к. – зона конденсации, з.и. – зона испарения

Применительно к условиям в бассейне, тепло от воды должно испарять теплоноситель в ТС, далее из-за гравитационных сил паровая фаза поступает в верхнюю часть конструкции и конденсируется за счет внешнего охлаждения,

возвращаясь вниз. Далее цикл повторяется, обеспечивая понижение температуры воды в бассейне. Для оценки габаритов термосифона и степени его погружения необходимо определить коэффициенты теплоотдачи.

Тепло, отводимое от воды в бассейне, рассчитывается по формулам свободной конвекции в большом объеме [4]:

$$Nu = 0,63 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25}, \quad (1)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot x^3}{\nu^2},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $1/\text{К}$ ;  $\Delta T$  – разница температур стенки и теплоносителя,  $^{\circ}\text{С}$ ;  $x$  – определяющий геометрический размер (подводная часть ТС),  $\text{м}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $Pr$  – число Прандтля.

Тогда коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$ :

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{x}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Температура насыщения рабочей среды внутри ТС должны быть ниже, чтобы обеспечить испарение в нижней части корпуса.

$$\alpha_2 = \frac{3,4 p_s^{0,18}}{1 - 0,0045 p_s} q^{2/3}, \text{ где} \quad (3)$$

$P_s$  – давление насыщения,  $\text{бар}$ ;  $q$  – тепловой поток,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Процесс конденсации происходит за счет отвода энергии, и теплоотдача считается по формуле конденсации пара на вертикальной стенке [4]:

$$\alpha_3 = 0,943 \sqrt[4]{\frac{g \cdot r \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu \cdot \Delta T \cdot h}}, \quad (4)$$

где  $r$  – теплота парообразования (конденсации),  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $\rho$  – плотность конденсата,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\Delta T$  – разница температур насыщения и стенки,  $^{\circ}\text{С}$ ;  $h$  – определяющий геометрический размер (надводная часть ТС),  $\text{м}$ .

Если в качестве теплоотводящей среды из верхней части ТС предусматривать вспомогательный контур, который также будет работать по принципу испарение – конденсация, то следует пользоваться формулой (3). Если отводящей средой будет являться окружающая среда, то применяются формулы (1), (2) для свободной конвекции по параметрам воздуха.

В дальнейшем, когда все коэффициенты теплоотдачи известны, можно рассчитать коэффициент теплопередачи  $k_1$  и  $k_2$ :

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_4}}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина стенки ТС, м;  $\lambda_{ст}$  – теплопроводность материала стенки, Вт/(м·К).

Уравнение теплового баланса позволяет записать:

$$Q_1 = k_1 \cdot F_1 \cdot \Delta t; \quad Q_2 = k_2 \cdot F_2 \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – площади поверхностей теплообмена подводной и надводной частей ТС. Чтобы соблюдалось условие  $Q_1 = Q_2$ , необходимо последовательно подбирать высоты нижней ( $x$ ) и верхней ( $h$ ) частей термосифона, которые входят в площади  $F_1$  и  $F_2$ .

Таким образом, в случае потери электроснабжения на АЭС термосифоны позволят избежать перегрева воды в БВ ОЯТ, обеспечат надежный теплоотвод. Термосифоны отличаются небольшим термическим сопротивлением, просты и автономны в работе, не требуют дополнительных затрат на транспортировку теплоносителя.

#### Список использованных источников

1. Ташлыков О. Л. Основы ядерной энергетики : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 212 с.
2. Ташлыков О. Л., Кузнецов А. Г., Арефьев О. Н. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС ; в 2 кн. М. : Энергоатомиздат, 1995. Кн. 1. 256 с.
3. Папченков А. И. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик термосифонов котлов-утилизаторов: дис. ... канд. тех. наук. Екатеринбург, 2018. 134 с.
4. Сапожников Б. Г. Тепломассообмен. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. 187 с.